

放電加工之表面裂紋敏感性研究

戴子堯¹ 李驊登² 呂學傑³

¹南台科技大學機械工程學系助理教授

²國立成功大學機械工程學系教授

³南台科技大學機械工程學系研究生

摘要

放電加工製程因特別適用於高強度高硬度材料，為模具刀具業等常用製程，但其加工後所生成的再鑄層常有裂紋等缺陷生成，嚴重影響加工品質，因此本研究主要探討材料特性與放電加工參數對放電加工表面裂紋敏感性的影響，實驗選定常用鋼料 SNCM439、SCM440、SKS93、SKS2、SK2、SKH51 和 SKD11 六種，並以不同放電加工參數進行放電加工，加工後則以掃描式電子顯微鏡觀察加工表面與再鑄層，以期能降低放電裂紋之生成，提升放電加工之品質。

研究結果顯示，在加工參數方面，隨放電電流的增加與持續時間的縮短可降低裂紋敏感性，在材料特性方面，材料的合金元素對裂紋敏感性也有影響，其合金元素所換算之碳當量值越小，或熱傳導係數越高時，可有效降低其裂紋敏感性，鋼料裂紋敏感性由小至大依序為：低合金鋼、碳素工具鋼、高速鋼與冷作工具鋼。

關鍵字：放電加工、裂紋敏感性、熱傳導係數、碳當量

Surface Crack Susceptibility of Electro-discharge Machining Process

Tzu-Yao Tai¹, Hwa-Teng Lee², Syue-Jie Lu¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Southern Taiwan University of Technology, Taiwan, Tainan,

² Department of Mechanical Engineering, National Cheng-Kung University, Taiwan, Tainan

Abstract

Electro-Discharge Machining (EDM) is ideally suited to the machining of materials with high hardness, strength and toughness mechanical properties, and has found widespread application in MEMS applications, tool and mold industries. However the formation of crack in recasted layer is harmful to the performance. The research is to evaluate the crack susceptibility of EDMed surface by changing the parameters of EDM and material properties. The working parameters chosen are pulse current and pulse-on duration. The subject materials are JIS SKS93, SNCM439, SCM440, SKS2, SK2, and

SKH9.

The results reveal that not only increasing the pulse current and shortening the pulse-on duration, but also a lower carbon equivalent and a higher thermal conductivity of material could reduce and improve the surface crack susceptibility. Finally, the crack susceptibility sequence of materials from low to high is low alloy steel, carbon tool steel, high speed steel, cold work steel.

Key words : EDM, crack susceptibility, thermal conductivity, carbon equivalent

1. 前言

工業的發展有賴於加工技術的進步，然而隨著各種特殊材料的應用與對工件精度的要求日益提高，特殊加工已受到業界之重視。由於放電加工之非接觸熱的加工特性，可以解決傳統加工以機械力加工在硬質、微小孔徑、薄細材料上之難切削、易變形等缺點，而使得放電加工技術為目前非傳統加工中最為業者普遍應用的一種加工方式。然而，放電加工工件表層性質是決定加工品質的重要指標之一，其表層性質除了和材質、熱處理及加工條件有密切關係外，也依工件使用條件以及環境差異而有不同的需求。

通常表面裂紋密度（單位面積上之裂紋總長度）會隨著放電能量的增加而提高，且裂紋往往會延伸至白層內部甚至母材，使得工件的疲勞強度、耐磨耗性與腐蝕抵抗性降低^[1-3]。因此大部分的工件在使用前會採用前處理(Post-processing Treatment)，即將表層去除後再使用。但以物盡其用的觀點來說，此方法並非唯一改善材料性能的方式之一，因為如同其它快速固化的材料，當白層上無裂紋形成時，此層具有提高材料表面硬度及抗腐蝕的作用。倘若能藉由對表面裂紋形成機制的瞭解，進一步抑制其形成，那麼白層非但不需去除，更能在材料加工成型的同時，亦增加其表面耐磨耗性與腐蝕抵抗性。因此為求改善工件的裂紋敏感性，對研究熔融材料在放電終止時，其固化行為與隨後產生的相變化是不容忽略的一環。此外，由先前 L. C. Lee^[4]所做研究當中，可初步得知材料之熱傳導係數對表面特性之影響，而材料之其它熱物理性質是否也有影響，值得作更進一步的研究。又由於裂紋之生成與放電加工參數有關，但是裂紋之發生與開裂之決定因素仍不十分明瞭，故本研究主要在探討裂紋生成機構及其與加工參數及材料特性之關連性。期望能對放電加工表面裂紋的生成有所瞭解，進而依據學理控制或抑制放電表面表面裂紋之生成。

2、實驗方法

為探討合金元素種類與含量之差異對表面裂紋敏感性的影響，本研究選擇低合金鋼、碳素工具鋼、高速鋼、冷作工具鋼等七種常用鋼料，分別為 SNCM439、SCM440、SK2、SKS2、SKS93、SKH9 以及 SKD11，其尺寸大小為 15×15×10mm，主要成分如表 1 所示，為求降低材料內部既有之殘留應力影響，實驗之材料均先經過退火熱處理。

Table1 The component of working materials.

化學成份表 (wt%) JIS 規格										
材 料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V
SNCM439	0.36~ 0.43	0.15~ 0.35	0.60~ 0.90	<0.03	< 0.03	1.60~ 2.00	0.60~ 1.00	0.15~ 0.30	-	-
SCM440	0.33~ 0.43	0.15~ 0.35	0.60~ 0.85	<0.03	< 0.03	-	0.90~ 1.20	0.15~ 0.30	-	-
SKS93	1.00~ 1.10	0.15~ 0.50	0.60~ 1.10	<0.03	< 0.03	-	0.10~ 0.6	-	-	-
SKS2	1.00~ 1.10	< 0.35	< 0.80	<0.03	< 0.03	-	0.50~ 1.0	-	1.00~ 1.50	-
SK2	1.10~ 1.30	< 0.35	< 0.50	<0.03	< 0.03	-	-	-	-	-
SKH51	0.80~ 0.90	< 0.45	< 0.45	<0.03	< 0.01	-	3.80~ 4.50	4.50~ 5.50	5.50~ 6.70	1.60~ 2.20
SKD11	1.40~ 1.60	0.15~ 0.35	0.30~ 0.60	<0.025	< 0.01	-	11.00 ~13.0 0	0.80~ 1.20	-	0.20~ 0.50

本實驗係使用台灣億曜 (YAWJET) 公司所生產的 CNC 放電加工機，加工液為煤油，放電電極為直徑 9.53mm 之電解銅圓棒，鑽孔深度則為 0.2mm。放電加工參數方面，放電電流與放電持續時間為影響放電加工後表面特性的主要放電加工參數，故針對這兩個加工參數來規劃實驗，本實驗共有四組加工參數，分別為放電電流 8A 與 20A，放電持續時間為 30 μ s 與 70 μ s，此外放電持續時間與休止時間的比值，也就是是衝擊因子 (Duty factor) 則固定為 0.5，

加工後的試件則以掃瞄式電子顯微鏡 SEM 觀察其加工面，表面裂縫有無的判別，乃固定在 500 倍的倍率下加以觀察，若無發現裂縫存在則判定為無裂縫，若出現裂縫則判定為有裂縫。表面裂紋密度的計算則是以 500 倍的照片，量取裂紋總長度後，除以照片面積後求得。

3、結果與討論

3-1 表面裂紋觀察

放電加工後，材料因高溫蒸發，或因表面金屬熔化，或因電弧柱衝擊表面，在急熱後驟冷之下，而有特殊之形貌，從圖 1 之 SKD11 加工後的表面中可以看出，加工表面缺陷包括有熔融組織、球狀附著物 (Globules of debris)、淺坑 (Shallow craters)、痘瘡 (Pockmaker)、空孔、飛濺物、裂紋 (Crack)。

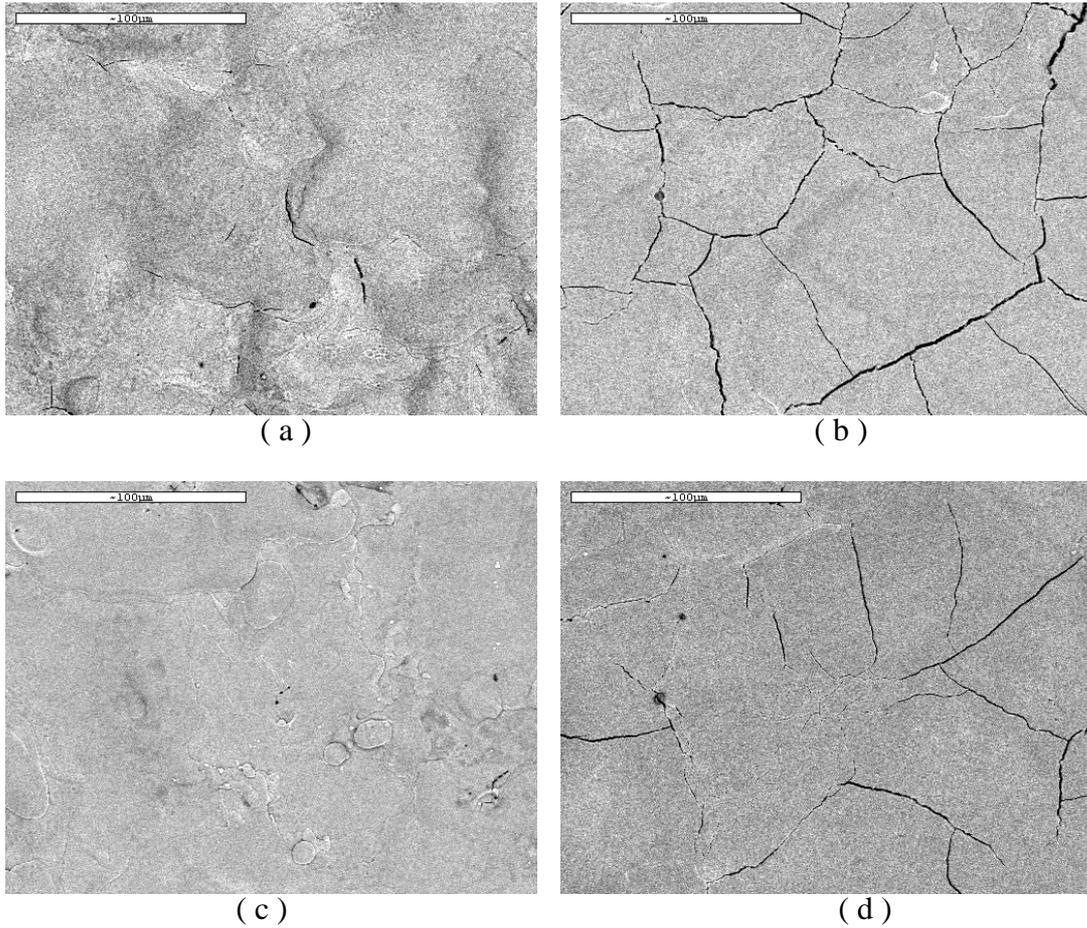


Fig.1 SEM photographs show that EDMed surface of SKD11
 (a) 8A/30µs (b) 8A/70µs (c) 20A/30µs (d) 20A/70µs

就表面裂紋與剖面試件裂紋的觀察中發現，裂紋通常是非常微小的裂紋 (Microcracks)，透過高倍率顯微鏡之下，可觀察到裂紋是開裂於試件表面，並且垂直往下穿透白層，絕多數是終止於白層裡或是白層的最下緣，只有極少的裂紋，會在貫穿整個白層後，繼續下裂而裂至母材處^[5, 6]，如圖 2 中所示。

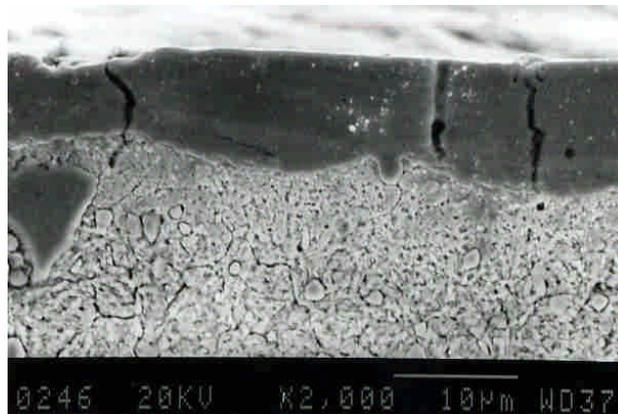


Fig.2 SEM photograph of cracking shows that crack penetration into parent materials

在四種放電條件下，七種鋼料之裂紋分佈型態，可觀察出裂紋分佈的型態與材料種類並無顯著之關連性，反而與放電條件較為相關。

3-2 表面裂紋密度

圖 3 為各鋼料在不同放電條件下之表面裂紋密度，由圖中可以歸納出，最不易開裂的鋼料為低合金鋼，再者為碳素工具鋼，而高速鋼與冷作工具鋼則次之。

若進一步探討放電加工參數與放電裂紋密度之關係，可以得知隨著放電電流的增加以及縮短持續時間，表面裂紋密度有逐漸下降的現象。雖然大放電電流能有效降低加工面的裂紋密度，但其所產生的裂紋寬度往往比小放電電流所生成的裂紋寬度為寬。由放電條件的角度而言，放電電流的增加可提高電漿通道的電流密度，使得局部的熔融金屬得以排除，也許因此而減少回熔金屬表層應力分佈不均的狀況，以抑制表面裂紋密度；而持續時間的增加，則是對於工件表面受熱體積有增加之效應，加上工件表面溫度提高^[7]，降低了加工面的冷卻速率，使得材料在冷卻過程中因溫度梯度較大，殘留之張應力提高，導致表面裂紋密度增加。此外另一可能影響之因素為當持續時間增加時，介電液中裂解的碳元素能有時間擴散至白層，使得白層在近加工液表面與其內部的滲碳濃度有異，因而在固化過程中收縮差異大，故冷卻過程中就容易生裂紋。

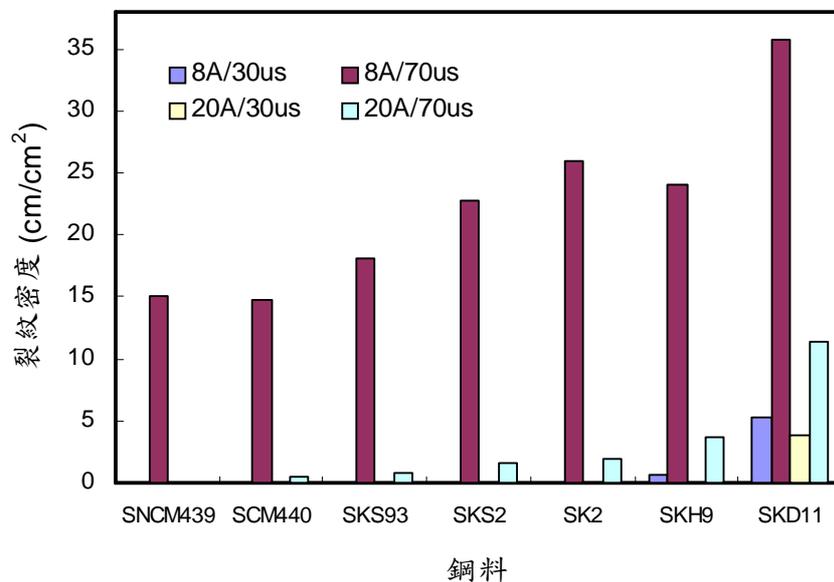


Fig.3 Surface crack density of materials under different working parameters

3-3 裂紋與材料之關係

由本實驗之七種鋼料與文獻^[4,8]資料顯示，當加工試件含有高碳或有大量

鉻、鎢、鉬等合金元素時，如：高碳工具鋼、熱作工具鋼、冷作工具鋼、高速鋼或不銹鋼時，放電表面較容易產生裂紋；相對中、低碳鋼或低合金鋼之加工表面則較不易出現裂紋。而材料影響裂紋之敏感性大抵可分為兩部分，一為母材本身的熱傳性，二為熔湯本身成分元素對白層凝固組織的影響，而後者又受前者所牽制。下文便嘗試著探討試料成分對放電回熔表層之凝固過程，說明影響試料在放電後表面易裂與不易裂之可能原因。

(a)合金的固化區間(Freezing Range)：

一般合金之過冷度可藉由添加合金元素或因雜質的存在而提高，使得熔湯在固化過程中固液相區間(Mushy Zone)擴大，導致材料在凝固時因有低熔點相可做為裂紋的成核點，造成放電表面之回熔層容易破裂。而鋼料中的雜質，如 S 或 P 或其它元素對於固液相區間之溫度影響如圖 4^[9]所示，圖中顯示材料中即便只添加微量的 P、S 或 C，將使得其固液相溫度區間快速擴展，而 Cr、Mo、V、Ni 等元素的效應則相對小了許多；反之，元素 Mn 則有縮短固液相溫度區間的作用。然而，鋼料在熔融固化階段，S、P 的存在傾向於偏析在晶界形成低熔點的化合物(如：FeS)，因此即便含量甚少，尚能造成部分的凝固破裂(Solidification Cracking)。

另外，由鐵-碳平衡相圖 5^[10]可知，當 C 含量超過 0.53wt% 時，沃斯田鐵為主要固化相，冷卻過程中體積收縮大於 δ -ferrite，使得材料之裂紋敏感性提高。除此之外，碳含量的提高，有助於 S、P 在晶界的偏析效應，使得材料之固化過程中產生熱裂的問題更為嚴重。因此，實驗中較易開裂的料，一般具有高含碳量。倘若僅以合金固化區間的因素作探討，以高碳工具鋼之三種鋼料 SKS93、SKS2 和 SK2 而言，SK2 之放電表面較其他二種試料更為容易產生裂紋。比較各個組成成分時，試料 SK2 雖然含碳量僅略高於 SKS2 與 SKS93，但 C 元素對於固液相區間的影響程度較其他的元素如：Cr 影響更為顯著，加上 SKS93 含有較多量的 Mn 可縮小試料在冷卻過程之過冷度，因此含有 Mn 之 SKS93 其放電表面裂紋密度為此三組鋼料中最低者；SK2 則為表面裂紋密度最高者。而較不易開裂的料，如：SNM439、SCM440 均含較多的 Mn 含量可縮短固液相溫度區間之差異，或許可相互做驗證。

(b) 熔融區之微觀組織：

一般含高碳當量的鋼料在快速冷卻過程中會產生相變態，由沃斯田鐵變態為麻田散鐵等急冷組織。然而，相變態的產生使得固化體積發生變化而產生應變及相對應力，此應力加上熱漲冷縮所產生的內應力將促成裂紋開展的驅動力。因此在焊接時，常以碳當量作為評估鋼料在焊接前需預熱之指標，當碳當量值越高相對焊接性較不良，因此在焊接前需將試件做預熱處理以防止裂紋的產生。表 2 為引用焊接冶金中換算碳當量的各項公式，評估本實驗中七種鋼料之碳當量對裂紋敏感性的關係。另外，表中亦列出了與碳當量相關之各試料硬度值做比較；同時也將各鋼料之抗拉強度以及其線膨脹係數列出。由表 2 可知，與放電表面裂紋敏感性最為相關之因子有碳當量以及熱傳導係數，而膨脹係數之效應似乎與裂紋敏感性成反比關係，但目前尚無合理解釋以說明其影響。

在表中的備註欄為各種鋼料用以預估其碳當量值之常用計算式⁽¹¹⁾，由各項公式中之元素相對碳當量係數可知，當鋼料中含有高量的 C、Mn、Cr、Mo 元素時，其碳當量相對提高許多，對照本實驗中鋼料的裂紋敏感性大至成正相關性，而部分未成相關的鋼料其碳當量值差異約在 0.5wt% 以下，造成此誤差的原因除了公式中各元素係數未依鋼種做調整外，尚有其它因素，如前述之元素對固液相區間的影響或下文將描述的因熱傳導造成熱應力的影響。因此在放電加工前，應可初步採用碳當量之算式以預估鋼料在急速冷卻後因組織產生相變態所導致內應力的相對大小，進而推測是否加工後表面容易出現裂紋。

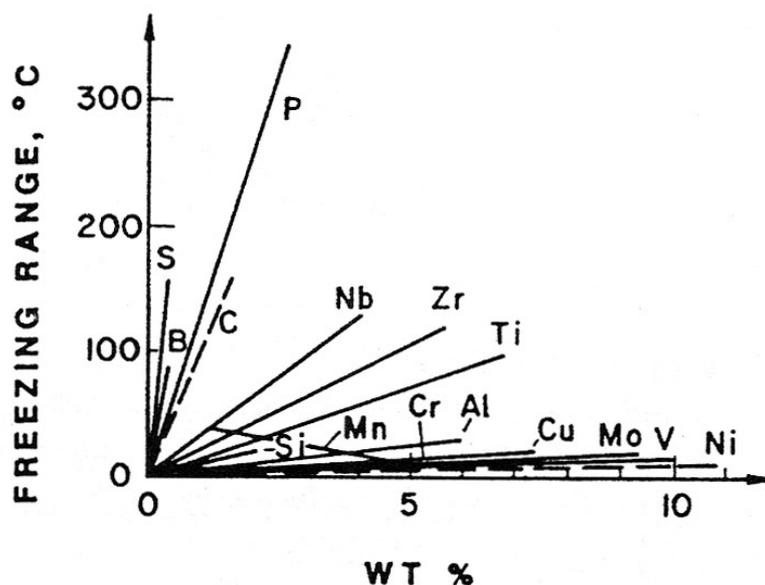


Fig.4 The freezing range of carbon steel and low alloy steel

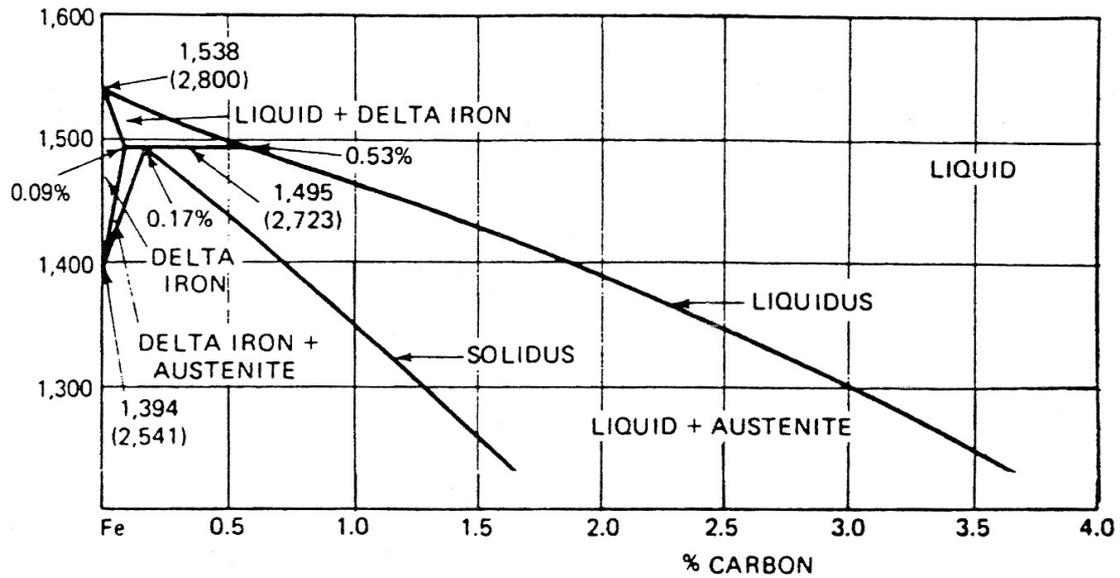


Fig.5 Iron-carbon phase diagram

Table 2 carbon equivalent of working materials

鋼料	Ceq(I) % (由小至大順序)	熱傳導係數 (W/m·K)	膨脹係數 ($\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$)	母材硬度 (HRB)	抗拉強度 (N/mm^2)	相對裂紋敏 感性
SNM439	0.82(2)	44.5(1)	12.4~14.3	42.3(2)	>980	↓ 小 大
SCM440	0.78(1)	41.8(2)	12.3~14.5	49.3(5)	>980	
SKS93	1.28(3)	—	—	39.1(1)	—	
SKS2	1.35(5)	30	12.6~15.3	50.1(6)	—	
SK2	1.30(4)	—	—	42.7(3)	—	
SKH9	3.02(6)	21.3(6)	10.1~12.2	51.9(7)	—	
SKD11	4.24(7)	20.9(7)	10.4~12.2	47.4(4)	—	
備註： Ceq(I) = $C + (1/6)\text{Mn} + (1/5)\text{Cr} + (1/4)\text{Mo} + (1/25)\text{Ni} + (1/24)\text{Si}$ ^[58] ：硬面焊接鋼料 Ceq(II) = $C + (1/6)\text{Mn} + (1/5)\text{Cr} + (1/4)\text{Mo} + (1/15)\text{Ni} + (1/13)\text{Cu}$ ^[59] ：低合金鋼 Ceq(III) = $C + (1/6)\text{Mn} + (1/5)\text{Cr} + (1/4)\text{Mo} + (1/40)\text{Ni} + (1/24)\text{Si} + (1/14)\text{V}$ ^[58] ：銲接構造用軋鋼料 SM 材 Ceq(IV) = $C + (1/6)\text{Mn} + (1/6)\text{Cr} + (1/6)\text{Mo} + (1/5)\text{Ni} + (1/5)\text{Cu} + (1/6)\text{V}$ ^[58] ：C-Mn 系非調質高張力鋼						

四、結論

1. 藉由增大放電電流可減少表面裂紋密度，但固定放電電流時，裂紋深度將隨持續時間增長，進而擴展至熱影響區。
2. 提高放電電流與縮短持續時間雖有抑制裂紋敏感性的作用，但當裂紋一生成，其開裂寬度往往較寬，且深入至熱影響區之裂紋比例亦相對較高，然而其總裂紋面積在持續時間為 $70\mu\text{s}$ 以下時，有隨放電電流之增加而呈現下降趨勢。
3. 以直徑 9.53mm 之電解銅電極加工本實驗鋼料發現，當鋼料之碳當量越高該鋼料之表面裂紋敏感性相對越大。此外，其熱傳導係數越高則有抑制裂紋的效果。本實驗中，裂紋敏感性由小至大依序為：低合金鋼、碳素工具鋼、高速鋼、冷作工具鋼，亦即為 $\text{SNM439}(0.82) < \text{SCM440}(0.78) < \text{SKS93}(1.28) < \text{SKS2}(1.35) < \text{SK2}(1.30) \approx \text{SKH9}(3.02) < \text{SKD11}(4.27)$ ，括弧內為該鋼料之碳當量值(wt%)

五、參考文獻

1. Randall Bormann, "Getting Those Better EDM'd Surfaces", Modern Machine Shop, pp.56~66, 1991.
2. A. G. Mamalis, G. C. Voaniakos, N. M. Vaxevanidis, "Macroscopic and Microscopic Phenomena of Electro-Discharge Machined Steel Surfaces : An Experimental Investigation", J. of Mechanical Working Technology, Vol.15, pp.335~356, 1987.
3. B. Bozkurt, A. M. Gadalla, and P. T. Eubank, "Simulation of Erosion in a Single Discharge EDM Process", Materials and Manufacturing Processes, Vol 11, No. 4, pp. 555-563, 1996.
4. L. C. Lee, L. C. Lim, Y. S. Wong, "Crack Susceptibility of Electro- discharge Machined," Journal of Materials Processing Technology, Vol.29, pp.213-221, 1992.
5. P. F. Thomson, "Surface Damage in Electrodischarge Machining", Materials Science and Technology, Vol 5, pp. 1153-1157, 1989.
6. C. P. Tabrett, "The Electro-Discharge Machining Surfaces of High-Chromium White Irons", Vol 15, pp. 1792-1794, 1996.
7. L. C. Lee, L. C. Lim, V. Narayanan, V. C. Venkatesh, "Quantification of Surface Damage of Tool Steels after EDM," International Journal of Machine Tool and Manufacture, Vol.28, No.4, pp.359-372, 1988.

8. P. C. Pandey and S. T. Jilani, "Plasma Channel Growth and the Resolidified Layer in EDM," Precision Engineering, Vol.8, No.2, pp.104-110, 1986.
9. Principles and Technology of the Fusion Welding of Metals, Vol.1, Mechanical Engineering Publishing Co., Peking, China, 1979.
10. Sindo Kou, "Welding Metallurgy," Wiley-Interscience publication, pp.219, 1987.
11. Properties and Selection of Metals, 8th edition, Vol.1